**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ**

**§ 1. Сущность и основные понятия метрологии**

**Метрология** — это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точ­ности.

Предмет метрологии как науки об измерениях составляют:

-общая теория измерений;

-единицы физических величин и их системы;

-методы и средства измерений;

-методы определения точности измерений;

-основы обеспечения единства измерений;

-эталоны единиц физических величин;

-методы передачи размеров единиц от эталонов к рабочим сред­ствам измерений.

В зависимости от цели различают три раздела метрологии:

1) В *теоретической (фундаментальной) метрологии* разра­батываются фундаментальные основы этой науки.

2) Предметом *законодательной метрологии* является установ­ление обязательных технических и юридических требований по при­менению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимой точности измерений. Законодательная метрология ставит главной за­дачей разработку комплекса взаимосвязанных и взаимообусловлен­ных общих правил, требований и норм, а также других вопросов, нуждающихся в регламентации и контроле со стороны государства. В большинстве стран мира меры по обеспечению единства и тре­буемой точности измерений установлены законодательно, и в Рос­сийской Федерации в 1993 г. был принят закон «Об обеспечении единства измерений».

3) *Практическая (прикладная) метрология* освещает вопро­сы практического применения разработок теоретической и положе­ний законодательной метрологии.

Все объекты окружающего мира характеризуются своими свой­ствами.

**Свойство** — философская категория, выражающая такую сто­рону объекта (явления, процесса), которая обусловливает его раз­личие или общность с другими объектами (явлениями, процессами) и обнаруживается в его отношениях к ним. Свойство — категория качественная. Для количественного описания различных свойств процессов и физических тел вводится понятие величины.

**Величина** *—* это свойство чего-либо, что может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно. Величина не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной.

*Идеальные величины* главным образом относятся к математике и являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий.

*Реальные величины* делятся, в свою очередь:

- на физические. *Физическая величина* — одно из свойств физи­ческого объекта, в качественном отношении общее для многих физических объектов, а в количественном — индивидуальное для каждого из них. Физическая величина (ФВ) в общем случае может быть определена как величина, свойственная материаль­ным объектам (процессам, явлениям), изучаемым в естественных (физика, химия) и технических науках;

- нефизические. К *нефизическим* следует отнести величины, при­сущие общественным (нефизическим) наукам — философии, со­циологии, экономике и т. д.

Познавательный процесс, заключающийся в сравнении путем физического эксперимента данной физической величины с известной физической величиной, принятой за единицу измерения, называет­ся **измерением**. Для того чтобы можно было сопоставить резуль­таты измерений, выполненных в разное время, с использованием различных методов и средств измерений, а также в различных по территориальному расположению местах, необходимо **единство из­мерений**. Единство измерений обеспечивается их свойствами: схо­димостью результатов измерений; воспроизводимостью результатов измерений; правильностью результатов измерений.

Процесс решения любой задачи измерения включает в себя, как правило, три этапа: подготовку, проведение измерения (эксперимен­та) и обработку результатов. В процессе проведения самого изме­рения во взаимодействие приводятся объект измерения и средство измерения.

**Средство измерения** — техническое устройство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические харак­теристики.

**§ 2. Физические единицы как объект измерения**

**Физическая величина** (ФВ) — это одно из свойств физическо­го объекта, в качественном отношении общее для многих физиче­ских объектов, а в количественном — индивидуальное для каждого из них.

Физические величины подразделяются на *измеряемые* (кото­рые могут быть выражены количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения) и *оцениваемые* (для ко­торых по тем или иным причинам не может быть введена единица измерения)*.*

Величины оценивают при помощи шкал. **Шкала величины** — упорядоченная последовательность ее значений, принятая по согла­шению на основании результатов точных измерений.

По ***видам явлений*** ФВ делятся на *вещественные* (описываю­щие физические и физико-химические свойства веществ, материалов и изделий из них), *энергетические* (описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использова­ния энергии) и *величины*, *характеризующие протекание процес­сов во времени.*

По ***принадлежности к различным группам физических процессов*** ФВ делятся на пространственно-временные, механиче­ские, тепловые, электрические и магнитные, акустические, световые, физико-химические, ионизирующих излучений, атомной и ядерной физики.

По ***степени условной независимости от других величин*** данной группы ФВ делятся на основные (условно независимые), производные (условно зависимые) и дополнительные.

В настоящее время в системе СИ используются семь физических величин, выбранных в качестве основных: длина, время, масса, темпе­ратура, сила электрического тока, сила света и количество вещества.

К дополнительным физическим величинам относятся плоский и телесный углы.

По ***наличию размерности*** ФВ делятся на размерные и безраз­мерные.

Основными понятиями, относящимися к физической величине, являются: размер физической величины, значение физической ве­личины, истинное значение физической величины, действительное значение физической величины, единица измерения физической величины, система физических величин, основная физическая ве­личина, производная физическая величина, система единиц фи­зических величин. Определение этих понятий приведено в глос­сарии.

ФВ фиксированного размера, которой условно присвоено число­вое значение, равное единице и применяемое для количественного выражения однородных ФВ, называется **единицей физической ве­личины**. Оценка размера ФВ в виде некоторого числа принятых для нее единиц — **значение физической величины.**

В практической деятельности необходимо проводить измерения различных величин, характеризующих свойства тел, веществ, явлений и процессов.

Понятия «физическая величина» и «измерение» тесным образом связаны с понятием **шкалы физической величины** — упорядо­ченной совокупностью значений физической величины, служащей исходной основой для измерений данной величины. **Шкалой из­мерений** называют порядок определения и обозначения возможных значений конкретной величины или проявлений какого-либо свой­ства. Понятия шкалы возникли в связи с необходимостью изучать не только количественные, но и качественные свойства природных и рукотворных объектов и явлений.

Различают пять основных типов шкал:

1. *Шкала наименований (классификации)* основана на припи­сывании свойствам объектов определенных чисел, которые выполня­ют функцию имен. В ней отсутствуют понятия «больше», «меньше», единицы измерения и нулевое значение. Процесс оценивания в та­ких шкалах состоит в достижении эквивалентности путем сравнения испытуемого образца с одним из эталонных образцов (например, атлас цветов). Таким образом, шкала наименований отражает каче­ственные свойства.

2. *Шкала порядка (ранжирования)* упорядочивает объекты относительно какого-либо их свойства в порядке убывания или возрастания, например, землетрясений (шкала Рихтера), силы морского ветра (шкала Бофорта), твердости материалов (шкала Мооса). Эти шкалы описывают уже количественные свойства. В них можно говорить лишь о том, что больше или меньше, хуже или лучше, но невозможно дать оценку, во сколько раз больше или меньше. В некоторых случаях в шкалах порядка может быть нулевая отметка.

3. *Шкала интервалов (разностей)* содержит разность значе­ний физической величины. Для этих шкал имеют смысл соотноше­ния эквивалентности, порядка, суммирования интервалов (разностей) между количественными проявлениями свойств. Шкала состоит из одинаковых интервалов, имеет условную (принятую по соглашению) единицу измерения и произвольно выбранное начало отсчета — нуль. Примером такой шкалы являются различные шкалы времени, начало которых выбрано по соглашению (от Рождества Христова, от переселения пророка Мухаммеда из Мекки в Медину). Темпе­ратурные шкалы Цельсия и Фаренгейта также являются шкалами интервалов. Результаты измерений по шкале интервалов (разностей) можно складывать и вычитать.

4. *Шкала отношений* — это шкала интервалов с естественным нулевым значением и принятой по соглашению единицей измерений. В ней нуль характеризует естественное нулевое количество данного свойства. Например, абсолютный нуль температурной шкалы. Это наиболее совершенная и информативная шкала. Результаты изме­рений в ней можно вычитать, умножать и делить. В некоторых слу­чаях возможна и операция суммирования для аддитивных величин. *Аддитивной* называется величина, значения которой могут быть суммированы, умножены на числовой коэффициент и разделены друг на друга (например, длина, масса, сила и др.). *Неаддитивной* величиной называется величина, для которой эти операции не име­ют физического смысла, например, термодинамическая температура. Примером шкалы отношений является шкала масс.

5. *Абсолютные шкалы* — это шкалы отношений, в которых од­нозначно (а не по соглашению) присутствует определение единицы измерения. Абсолютные шкалы присущи относительным единицам (коэффициенты усиления, полезного действия и др.), единицы таких шкал являются безразмерными.

Шкалы наименований и порядка называют *неметрическими (концептуальными),* а шкалы интервалов и отношений — *метри­ческими (материальными).* Абсолютные и метрические шкалы от­носятся к разряду линейных.

Совокупность физических величин, образованная в соответ­ствии с принципами, когда одни величины принимаются за неза­висимые, а другие являются их функциями, называется **системой физических величин***.*

Обоснованно, но произвольным образом выбираются несколько ФВ, называемых *основными.* Остальные величины, называемые *про­изводными,* выражаются через основные на основе известных уравне­ний связи между ними (например, плотность вещества, ускорение).

**§ 3. Международная система единиц физических величин**

**Системой единиц физических величин** называется совокуп­ность основных и производных единиц физических величин, образо­ванная в соответствии с принятыми принципами.

Развитие науки и техники потребовало унификации единиц из­мерений. Требовалась единая система единиц, удобная для практиче­ского применения и охватывающая различные области измерений.

В 1960 г. ХI Генеральная конференция по мерам и весам утвер­дила Международную систему единиц физических величин (рус­ское обозначение СИ, международное SI) на основе шести основных единиц: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина и свеча. В 1971 г. к СИ была добавлена седьмая основная единица — коли­чества вещества (моль). Кроме основных Генеральной конференцией были утверждены дополнительные и производные единицы физиче­ских величин.

**Основные принципы построения СИ**:

- система базируется на основных единицах, которые являются не­зависимыми друг от друга;

- производные единицы образуются по простейшим уравнениям связи и для величины каждого вида устанавливается только одна единица СИ;

- система является когерентной;

- допускаются наряду с единицами СИ широко используемые на практике внесистемные единицы;

- в систему входят десятичные кратные и дольные единицы.

**Преимущества СИ:**

- универсальность, т. к. она охватывает все области измерений;

- унификация единиц для всех видов измерений — применение одной единицы для данной физической величины, например, для давления, работы, энергии;

- единицы СИ по своему размеру удобны для практического применения;

- переход на нее повышает уровень точности измерений, т. к. основные единицы этой системы могут быть воспроизведены бо­лее точно, чем единицы других систем;

- это единая международная система и ее единицы распространены.

Генеральная конференция разработала следующие **определения основных единиц:**

- единица длины —*метр* — длина пути, которую проходит свет в вакууме за 1/299792458 долю секунды;

- единица массы —*килограмм* — масса, равная массе междуна­родного прототипа килограмма;

- единица времени —*секунда* — продолжительность 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия- 133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей;

- единица силы электрического тока —*ампер* — сила неиз­меняющегося тока, который при прохождении по двум парал­лельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, создал бы между этими проводниками силу, равную 2\*10-7 Н на каждый метр длины;

- единица термодинамической температуры — *кельвин* — 1/273,161 часть термодинамической температуры тройной точки воды. До­пускается также применение шкалы Цельсия;

- единица количества вещества —*моль* — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколь­ко атомов содержится в нуклиде углерода-12 массой 0,012 кг;

- единица силы света —*кандела* — сила света в заданном на­правлении источника, испускающего монохроматическое излу­чение частотой 540\*1012 Гц, энергетическая сила которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/cp.

В систему СИ введены две **дополнительные единицы** — ра­диан и стерадиан.

- единица плоского угла —*радиан —* угол между двумя радиуса­ми окружности, длина дуги которой равна радиусу. В градусном исчислении радиан равен 57°17΄44,8΄΄;42

- единица телесного угла — с*терадиан —* телесный угол с вер­шиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы пло­щадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Дополнительные единицы СИ использованы для образования единиц угловой скорости, углового ускорения и некоторых других величин. Сами по себе радиан и стерадиан применяются в основном для теоретических построений и расчетов.

**Производная единица СИ** — это единица производной фи­зической величины системы единиц, образованная в соответствии с уравнениями, связывающими ее с основными единицами или с основными и уже определенными производными.

Производные единицы бывают когерентными и некогерентными.

***Когерентной*** называется производная единица физической ве­личины, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель принят равным единице (например, единица скорости — м/с). Если уравнение связи содержит числовой коэффициент, отличный от единицы, то для образования когерент­ной единицы СИ в правую часть уравнения подставляют величины со значениями в единицах СИ, дающие после умножения на коэф­фициент общее числовое значение, равное единице.

Различают кратные и дольные единицы ФВ.

*Кратная единица —* это единица ФВ, в целое число раз превы­шающая системную или внесистемную единицу. Например, единица длины — километр — равна 103 м, т. е. кратна метру.

*Дольная единица* — единица ФВ, значение которой в целое число раз меньше системной или внесистемной единицы. Напри­мер, единица длины — миллиметр — равна 10-3 м, т. е. является дольной.

Все основные, производные, кратные и дольные единицы явля­ются системными. **Системная единица** — единица ФВ, входящая в одну из принятых систем. Единицы ФВ, не входящие ни в одну из принятых систем единиц называются **внесистемными**.

Внесистемные единицы по отношению к единицам СИ разделяют на четыре вида:

- допускаемые наравне с единицами СИ: например, единица мас­сы — тонна; плоского угла — градус, минута, секунда; объе­ма — литр и др.;

- допускаемые к применению в специальных областях: например, астрономическая единица, парсек, световой год — единицы дли­ны в астрономии; диоптрия — единица оптической силы в опти­ке; электрон-вольт — единица энергии в физике и т. д.;

- временно допускаемые к применению наравне с единицами СИ: например, морская миля — в морской навигации; карат — единица массы в ювелирном деле и др. Эти единицы должны изыматься из употребления в соответствии с международными соглашениями;

- изъятые из употребления: например, миллиметр ртутного стол­ба — единица давления; лошадиная сила — единица мощности и некоторые другие.

В СССР Международная система (СИ) была введена в действие ГОСТ 8.417-81. В настоящее время в РФ действует межгосударствен­ный стандарт ГОСТ 8.417-2002, который устанавливает единицы фи­зических величин, применяемых в стране.

**§ 4. Единство измерений. Эталоны и их классификация**

Для того чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разное время, с использованием различных методов и средств измерений, а также в разных по территориальному рас­положению местах, необходимо единство измерений.

Под **единством измерений** понимается характеристика каче­ства измерений, заключающаяся в том, что их результаты выража­ются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам воспроизведенных величин, а погрешно­сти результатов измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы.

Для обеспечения единства измерений необходима тождествен­ность единиц, в которых проградуированы все средства измерения одной и той же физической величины. Это достигается путем точного воспроизведения и хранения установленных единиц физических ве­личин и передачи их размеров применяемым средствам измерения.

Воспроизведение, хранение и передача размеров единиц осу­ществляются с помощью эталонов и образцовых средств измерения. Высшим звеном в метрологической цепи передачи размеров единиц измерений являются эталоны. **Эталон** — это средство измерения (или комплекс средств измере­ния), обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы физиче­ской величины (или одну из этих функций) с целью передачи размера единицы образцовым, а от них — рабочим средствам измерения и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке.

**Эталон должен обладать взаимосвязанными свойствами**:

*- воспроизводимость*— возможность воспроизведения единицы физической величины (на основе ее теоретического определения) с наименьшей погрешностью для существующего уровня разви­тия измерительной техники;

*- неизменность*— свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного ин­тервала времени;

*- сличаемость* предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сли­чений и сами не претерпевают изменений при проведении сли­чения.

***По своему метрологическому назначению*** эталоны делятся:

— на первичные. **Первичный эталон** воспроизводит единицу с наивысшей в стране точностью в соответствии с ее определением. Первичные эталоны составляют основу государственной системы обеспечения единства измерений;

— специальные. **Специальный эталон** обеспечивает воспроиз­ведение единицы физической величины в особых условиях, в ко­торых прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью не осуществима и для этих условий заменяет первичный эталон.

Первичный или специальный эталон, официально утвержденные в качестве исходного для страны, называются **государственным эталоном**. Его утверждение проводит Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Государственные эта­лоны создаются, хранятся и применяются центральными метрологи­ческими научными институтами страны. В состав государственных эталонов включаются средства измерения, с помощью которых хра­нят и воспроизводят размер единицы физической величины с точ­ностью, которая должна соответствовать уровню лучших мировых достижений и удовлетворять потребностям науки и техники, а также средства измерения с помощью которых контролируют условия из­мерений и неизменность воспроизводимого или хранимого размера единицы и осуществляют передачу размера единицы. Государствен­ные эталоны России периодически сличаются с государственными эталонами других стран;

— **вторичные эталоны**, значения которых устанавливаются по первичным эталонам. В метрологической практике они широко распространены. Вторичные эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размера. Они создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ и для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона.

Вторичные эталоны подразделяются на три вида:

1) ***Эталон-копия*** предназначен для передачи размера единицы *рабочим эталонам.* Рабочий эталон применяется для передачи размера единицы *рабочим средствам измерений*.

Эталон-копия представляет собой копию государственного эта­лона только по метрологическому назначению, поэтому он всегда является его физической копией.

2) ***Эталон сравнения*** применяется для сличения эталонов, кото­рые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом.

3) ***Эталон-свидетель*** предназначен для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты.

Государственные эталоны всегда осуществляются в виде ком­плекса средств измерений и вспомогательных устройств, обеспе­чивающих воспроизведение единицы и, в необходимых случаях, ее хранение, а также передачу размера единицы вторичным эталонам. Вторичные же эталоны могут осуществляться в виде комплекса средств измерений, одиночных эталонов, групповых эталонов, на­боров.

Эталонная база России имеет около 120 государственных этало­нов и более 250 вторичных эталонов единиц физических величин, размещенных в ведущих метрологических научно-исследовательских институтах страны.

Кроме национальных эталонов единиц физических величин су­ществуют **международные эталоны**, которые хранятся в Между­народном бюро мер и весов. Программой деятельности этого бюро предусмотрены систематические сличения национальных эталонов крупнейших метрологических лабораторий разных стран с между­народными эталонами и между собой.

Обеспечение правильной передачи размера единиц физических величин (и, как следствие, обеспечение единства измерений) во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством повероч­ных схем.

**Поверочная схема** — это нормативный документ, который устанавливает соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим средствам измере­ний (с указанием методов и погрешности при передаче). Различают государственные и локальные поверочные схемы.

Государственная поверочная схема передачи единиц измерения физических величин от эталонов к образцовым и рабочим средствам измерений представлена на рисунке.

Согласно представленной схеме между разрядами рабочих эталонов существует соподчиненность: рабочие эталоны 1 разряда поверяются, как правило, непосредственно по вторичным этало­нам, рабочие эталоны 2-го и последующих разрядов подлежат поверке по рабочим эталонам непосредственно предшествующих разрядов.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Точность средства измерений  ------------------------------------→ | Первичный эталон | | |
| ↓ | |
| Вторичный эталон | |
| ↓ | |
| Рабочие эталоны 1 разряда | → | Рабочие СИ высшей точности |
| ↓ | |
| Рабочие эталоны 2 разряда | → | Рабочие СИ высокой точности |
| ↓ | |
| Рабочие эталоны 3 разряда | → | Рабочие СИ повышенной точности |
| ↓ | |
| Рабочие эталоны 4 разряда | → | Рабочие СИ нормальной точности |
| ↓ | |
| Рабочие эталоны 5 разряда | → | Технические СИ |

Государственная схема передачи единиц измерения физических величин от эталонов к образцовым и рабочим средствам измерений

**§ 5. Виды и методы измерений физических величин**

**По способу получения информации** различают:

1. *Прямые измерения*, которые состоят в том, что искомое значе­ние измеряемой величины находят из опытных данных с помо­щью средств измерения (линейки, рулетки, термометра и т. д.).
2. *Косвенные измерения,* применяемые в тех случаях, когда ис­комую величину невозможно или очень сложно измерить не­посредственно, т. е. прямым видом измерения, или когда пря­мой вид измерения дает менее точный результат (например, определение удельного электрического сопротивления прово­дника по его сопротивлению, длине и площади поперечного сечения и т. д.).
3. *Совокупные измерения,* сопряженные с решением системы уравнений, составляемых по результатам одновременных изме­рений нескольких однородных величин. Решение системы урав­нений дает возможность вычислить искомую величину. Приме­ром совокупных измерений является калибровка гирь набора по известной массе одной из них и по результатам прямых сравне­ний масс различных сочетаний гирь.
4. *Совместные измерения*— одновременные измерения двух или нескольких неодноименных величин для нахождения зависимо­сти между ними (например, измерения объема тела, произво­димые с измерениями различных температур, обусловливающих изменение объема этого тела). Совокупные и совместные изме­рения часто применяют в измерениях различных параметров и характеристик в области электротехники.

**По отношению к основным единицам измерения**:

1. *Абсолютные измерения* — измерения, при которых использу­ются прямое измерение одной (иногда нескольких) основной ве­личины и физическая константа.
2. *Относительные измерения* основаны на измерении отношения измеряемой величины, играющей роль единицы, или измерений величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

**По характеру изменений измеряемой величины в процессе измерений** различают:

1. *Статистические измерения,* связанные с определением ха­рактеристик случайных процессов, звуковых сигналов, уровня шумов и т. д.
2. *Статические измерения,* имеющие место тогда, когда измеряе­мая величина практически постоянна.
3. *Динамические измерения,* связанные с такими величинами, ко­торые в процессе измерений претерпевают те или иные измене­ния. Статические и динамические измерения в идеальном виде на практике редки.

**По количеству измерительной информации:**

1. *Однократные измерения* — это одно измерение одной вели­чины, т. е. число измерений равно числу измеряемых величин. Практическое применение такого вида измерений всегда сопря­жено с большими погрешностями, поэтому следует проводить не менее трех однократных измерений и находить конечный резуль­тат как среднее арифметическое значение.
2. *Многократные измерения* характеризуются превышением чис­ла измерений количества измеряемых величин. Преимущество многократных измерений — в значительном снижении влияний случайных факторов на погрешность измерения.

Для точного измерения величин в метрологии разработаны прин­ципы и приемы использования средств измерения, применение ко­торых позволяет исключить из результатов измерения ряд система­тических погрешностей и тем самым освобождает экспериментатора от необходимости определять многочисленные поправки для их ком­пенсации. Многие из этих приемов используют при измерении толь­ко определенных величин, однако существуют и некоторые общие приемы, названные **методами измерения**.

**Основными методами измерений** являются:

***1. Метод непосредственной оценки*** — метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчет­ному устройству измерительного прибора прямого действия, напри­мер, взвешивание на циферблатных весах, определение размера де­тали с помощью микрометра или измерение давления пружинным манометром.

С помощью этого метода измерения проводятся очень быстро, просто и не требуют высокой квалификации оператора, поскольку не приходится создавать специальные измерительные установки и выполнять какие-либо сложные вычисления. Однако точность из­мерения чаще всего оказывается невысокой из-за погрешностей, свя­занных с необходимостью градуировки шкал приборов и воздействи­ем влияющих факторов (непостоянства температуры, нестабильности источников питания и пр.).

***2. Методы сравнения с мерой*** — методы, при которых измеряе­мая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой:

*- дифференциальный метод* характеризуется измерением разно­сти между измеряемой величиной и известной величиной, вос­производимой мерой;

*- нулевой метод* при котором разность между измеряемой вели­чиной и мерой сводится к нулю. При этом нулевой метод имеет то преимущество, что мера может быть во много раз меньше из­меряемой величины, например взвешивание на весах, когда на одном плече находится взвешиваемый груз, а на другом — на­бор эталонных грузов;

*- метод замещения* — метод сравнения с мерой, в котором из­меренную величину замещают известной величиной, воспроиз­водимой мерой. Метод замещения применяется при взвешивании с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашу весов;

*- метод совпадений* — метод сравнения с мерой, в котором раз­ность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводи­мой мерой, измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов. Примером использования данного ме­тода может служить измерение длины при помощи штангенцир­куля с нониусом.

**§ 6. Виды и метрологические характеристики средств измерения**

**Средство измерения (СИ)** — это техническое средство, пред­назначенное для измерений, имеющее нормированные метрологи­ческие характеристики, воспроизводящее и/или хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интер­вала времени.

Различают следующие *виды средств измерений*:

**\* Мера**— это средство измерений, предназначенное для воспро­изведения физической величины заданного размера. Меры могут быть однозначными и многозначными. Однозначные меры (напри­мер, гиря) воспроизводят одно значение физической величины, мно­гозначные (например, магазин сопротивлений) служат для воспроиз­ведения ряда значений одной и той же физической величины.

**\*Измерительные устройства:**

***Измерительный прибор*** — средство измерения, предназна­ченное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительные приборы классифицируют по *назначению* (уни­версальные и специальные), *конструктивному устройству* (ме­ханические, оптические, электрические, пневматические и др.) и по *степени автоматизации* (ручного действия, механизированные, полуавтоматические и автоматические).

***Измерительный преобразователь*** — средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информа­ции в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

**\* Измерительная установка** — совокупность функционально объединенных средств измерений (мер, измерительных приборов, из­мерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, пред­назначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем и расположенная на одном месте.

**\*Измерительная система** — совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой канала­ми связи, предназначенная для выработки сигналов измеритель­ной информации в форме, удобной для автоматической обработ­ки, передачи и (или) использования в автоматических сигналах управления.

Оценка пригодности средств измерений для решения тех или иных измерительных задач проводится путем рассмотрения их ме­трологических характеристик.

**Метрологическая характеристика** — характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и его погрешность. Метрологические характеристики позволяют су­дить об их пригодности для измерений в известном диапазоне с из­вестной точностью.

Для каждого типа СИ устанавливаются свои метрологические характеристики. На практике наиболее распространенными являют­ся следующие:

***\*Диапазон измерений СИ*** — область значений величины, в пределах которой нормированы его допускаемые пределы погреш­ности. Для мер это их номинальное значение, для преобразовате­лей — диапазон преобразования. Различают нижний и верхний пределы измерений, которые выражаются значениями величины, ограничивающими диапазон измерений снизу и сверху.

***\*Пределы измерения*** — наибольшее или наименьшее значение диапазона измерения.

***\*Цена деления шкалы***— разность значений величин, соответ­ствующих двум соседним отметкам шкалы.

***\*Длина (интервал) деления шкалы***— расстояние между ося­ми двух соседних отметок шкалы.

***\*Погрешность СИ***— разность между показанием средства из­мерений — ***Хп*** и истинным (действительным) значением измеряе­мой величины — ***Хд***.

Существует распространенная классификация погрешностей средств измерений. Ниже приводятся примеры их наиболее часто используемых видов.

**В зависимости от условий проведения измерений** погреш­ности средств измерений подразделяются на основные и дополни­тельные.

***\**Основная погрешность СИ** — погрешность средства изме­рений, применяемого в нормальных условиях, т. е. в условиях, ко­торые определены в НТД на него как нормальные. Нормальные значения влияющих величин указываются в стандартах или тех­нических условиях на средства измерений данного вида в форме номиналов с нормированными отклонениями. Наиболее типичными нормальными условиями являются температура (20 ± 5)ºС; относи­тельная влажность (65 ± 15)%; атмосферное давление (100 ± 4) кПа или (750 ± 30) мм рт. ст.; напряжение питания электрической сети 220 В ± 2% с частотой 50 Гц. Иногда вместо номинальных значений влияющих величин ука­зывается нормальная область их значений. Например, влажность (30–80)%.

*Пределы допускаемой основной погрешности* задают в виде:

***- абсолютной погрешности СИ*** — погрешности средства из­мерений, выраженной в единицах измеряемой величины: ΔХ = Хп – Хд. Если абсолютная погрешность не изменяется во всем диапазоне изме­рения, то она называется *аддитивной*, если она изменяется пропорцио­нально измеряемой величине (увеличивается с ее увеличением), то она называется *мультипликативной;*

***- относительной погрешности СИ*** — погрешности сред­ства измерений, выраженной отношением абсолютной погрешности СИ к результату измерений или к действительному значению из­меренной величины: δ = ΔХ / Хд. Относительная погрешность дает наилучшее из всех видов погрешностей представление об уровне точности измерений;

***- приведенной погрешности СИ*** .— относительной по­грешности, выраженной отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины ХN, которое называют нормирующим:

γ = ΔХ / ХN. Приведен­ные погрешности позволяют сравнивать по точности средства из­мерений, имеющие разные пределы измерений, если абсолютные погрешности каждого из них не зависят от значения измеряемой величины.

Относительные и приведенные погрешности обычно выражают либо в процентах, либо в относительных единицах (долях единицы).

**\*Дополнительная погрешность СИ**— составляющая по­грешности СИ, возникающая дополнительно к основной погреш­ности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения.

**В зависимости от режима применения** различают:

***- статическую погрешность*** . ***СИ*** — погрешность, возни­кающую при использовании измерительных средств для измерения постоянной величины;

***- динамическую погрешность СИ*** .— погрешность, возни­кающую при использовании измерительного средства для измерения переменной во времени величины.

**По своему происхождению** погрешности подразделяются:

— на **систематические погрешности СИ** — составляющие погрешности средства измерений, принимаемые за постоянную или закономерно изменяющуюся. Систематические погрешности являют­ся в общем случае функциями измеряемой величины и влияющих величин (температуры, влажности, давления, напряжения питания и т. п.);

— **случайные погрешности СИ** — составляющие погрешности средства измерений, изменяющиеся случайным образом. Случайные погрешности средств измерений обусловлены случайными измене­ниями параметров составляющих эти СИ элементов и случайными погрешностями отсчета показаний приборов.

***Стабильность СИ***— качественная характеристика сред­ства измерений, отражающая неизменность во времени его метроло­гических характеристик.

***Градуировочная характеристика СИ***— зависимость между значениями величин на входе и выходе средства измерений, полученная экспериментально. Может быть выражена в виде фор­мулы, графика или таблицы.

**§ 7. Качество измерений и способы его достижения**

Процесс измерения неизбежно сопровождается ошибками, ко­торые вызываются несовершенством измерительных средств, не­стабильностью условий проведения измерений, несовершенством самого метода и методики измерений, недостаточным опытом и не­совершенством органов чувств человека, выполняющего измерения, а также другими факторами.

Под **качеством измерений** понимают совокупность свойств, обусловливающих получение результатов с требуемыми точностны­ми характеристиками, в необходимом виде и в установленные сроки. Качество измерений характеризуется такими показателями, как точ­ность, правильность и достоверность.

При практическом использовании тех или иных измерений важно оценить их точность. Термин «**точность измерений**», т. е. степень приближения результатов измерения к некоторому действительному значению, не имеет строгого определения и используется для каче­ственного сравнения измерительных операций. Для количественной оценки используется понятие **«погрешность измерений»** (чем меньше погрешность, тем выше точность). Оценка погрешности из­мерений — одно из важных мероприятий по обеспечению единства измерений.

Введение понятия «погрешность» требует определения и четкого разграничения трех понятий:

1) **Истинное значение измеряемой физической величины** — это значение, идеальным образом отражающее свойство данного объекта как в количественном, так и в качественном отношении. На практике оно практически всегда неизвестно.

2) **Действительное значение измеряемой физической вели­чины** — значение, найденное экспериментально и настолько при­ближающееся к истинному, что для данной цели оно может быть использовано вместо него. Действительное значение может быть по­лучено при помощи рабочих эталонов.

3) **Результат измерения** — приближенная оценка истинного значения величины, найденная путем измерения (результат, полу­ченный с помощью рабочего средства измерения).

**Погрешность результата измерения** — это отклонение ре­зультата измерения от истинного значения измеряемой величины.

**По способу выражения** различают:

1) Погрешность измерения, выраженную в единицах измеряемой величины, которая называется **абсолютной**. Она не всегда является информативной. Например, абсолютная погрешность 0,01 мм может быть достаточно большой при измерениях величин в десятые доли миллиметра и малой при измерениях величин, размеры которых пре­вышают несколько метров.

2) Более информативную **относительную погрешность**, под которой понимают отношение абсолютной погрешности измерения к ее истинному значению (или математическому ожиданию). Именно относительная погрешность используется для характеристики точ­ности измерения.

3) **Приведенную погрешность**, представляющую собой отно­шение абсолютной погрешности к нормирующему значению (посто­янному во всем диапазоне измерений или его части).

В **зависимости от характера проявления, причин возник­новения и возможностей устранения** различают систематиче­скую и случайную составляющие погрешности измерений, а также грубые погрешности (промахи).

К **систематическим погрешностям** относят те, которые при повторных измерениях остаются постоянными или изменяются по какому-либо закону.

Систематические погрешности при измерении одним и тем же методом и одними и теми же измерительными средствами всегда имеют постоянные значения. К причинам, вызывающим их появле­ние, относят:

*- субъективную составляющую,* связанную с индивидуальными особенностями оператора. Как правило, эта погрешность возни­кает из-за ошибок в отсчете показаний (примерно 0,1 деления шкалы) и неопытности оператора. В основном же систематиче­ские погрешности возникают из-за методической и инструмен­тальной составляющих;

*- методическая составляющая* — *погрешности метода, или теоретические погрешности,* — происходят вследствие ошибок или недостаточной разработанности метода измерений. Сюда же можно отнести неправомерную экстраполяцию свойства, получен­ного в результате единичного измерения, на весь измеряемый объ­ект. Например, принимая решение о годности вала по единичному измерению, можно допустить ошибку, поскольку не учитываются такие погрешности формы, как отклонения от цилиндричности, круглости, профиля продольного сечения и др. Поэтому для ис­ключения такого рода систематических погрешностей в методике измерений рекомендуется проведение измерений в нескольких местах деталей и взаимно-перпендикулярных направлениях.

К погрешностям метода относят также влияние инструмента на свойства объекта (например, значительное измерительное усилие, изменяющее форму тонкостенной детали) или погрешности, связан­ные с чрезмерно грубым округлением результата измерения;

*- инструментальная составляющая.* Инструментальные по­грешности связаны с погрешностями средств измерения, вызван­ными погрешностями изготовления или износом составных ча­стей измерительного средства;

*- погрешности, вызванные воздействием окружающей среды и условий измерения*: температура (например, измерения еще не остывшей детали), вибрации, нежесткость поверхности, на ко­торую установлено измерительное средство, и т. п.

Одним из методов обнаружения систематической погрешности может быть замена

средства измерений на аналогичное в случае, если оно предположительно является

источником систематической погрешности. Подобным образом можно обнаружить

систематиче­скую погрешность, вызванную внешними условиями: например, за­мена

поверхности, на которую установлено измерительное средство, на более жесткую.

Появление систематической погрешности можно обнаружить статистически, нанося с заданной периодичностью результаты изме­рений на бумагу с заданными границами (например, предельными размерами). Устойчивое движение результата измерений в сторону одной из границ будет означать появление систематической погреш­ности и необходимости вмешательства в технологический процесс.

Для исключения систематической погрешности в производственных условиях проводят проверку средств измерений, устраняют те причины, которые вызваны воздействиями окружающей среды, сами измерения проводят в строгом соответствии с рекомендуемой методикой, прини­мая в необходимых случаях меры по ее совершенствованию.

Постоянные систематические погрешности не влияют на значе­ния случайных отклонений измерений от средних арифметических, поэтому их сложно обнаружить статистическими методами. Анализ таких погрешностей возможен только на основании априорных зна­ний о погрешностях, получаемых, в частности, при поверке средств измерений. Например, при поверке средств измерений линейных величин измеряемая величина обычно воспроизводится образцовой мерой (концевой мерой длины), действительное значение которой известно. Систематические погрешности приводят к искажению ре­зультатов измерений и потому должны выявляться и учитываться при оценке результатов измерений. Полностью систематическую по­грешность исключить практически невозможно; всегда в процессе измерения остается некая малая величина, называемая неисключен­ной систематической погрешностью. Эта величина учитывается пу­тем внесения поправок.

Разность между средним арифметическим значением результа­тов измерения и значением меры с точностью, определяемой погреш­ностью при ее аттестации, называется **поправкой**. Она вносится в паспорт аттестуемого средства измерения и принимается за искомую систематическую погрешность. Оставшаяся необнаруженной систематическая составляющая опаснее случайной: если случайная погрешность вызывает вариа­цию (разброс) результатов, то систематическая устойчиво их иска­жает (смещает). В любом случае отсутствие или незначительность (с целью пренебрежения) систематической погрешности нужно до­казать.

В ряде случаев систематическая составляющая может быть ис­ключена за счет устранения источников погрешности до начала из­мерений (профилактика), а в процессе измерений — путем внесения известных поправок в результаты.

*Профилактика погрешности* — наиболее рациональный спо­соб ее снижения, заключается в устранении влияния, например, тем­пературы (термостатированием и термоизоляцией), магнитных полей (магнитными экранами), вибраций и т. п. Сюда же относятся регу­лировка, ремонт и поверка СИ.

Исключение постоянных систематических погрешностей в про­цессе измерений осуществляют методом сравнения (замещения, противопоставления), компенсации по знаку (предусматривают два наблюдения, чтобы в результат каждого измерения систематическая погрешность входила с разным знаком), а исключение переменных и прогрессирующих — способами симметричных наблюдений или наблюдением четное число раз через полупериоды.

**Случайные погрешности** — это погрешности, принимающие при повторных измерениях различные, независимые по знаку и величине значения, не подчиняющиеся какой-либо закономерно­сти. Причин, вызывающих случайные погрешности, может быть много: например, колебание припуска на обработку, механические свойства материалов, посторонние включения, точность установ­ки деталей на станок, точность средства измерения в заготовке, изменение измерительного усилия крепления детали на станке, силы резания и др.

Как правило, индивидуальное влияние каждой из этих причин на результаты измерения невелико и не поддается оценке, тем более, что, как всякое случайное событие, оно в каждом конкретном случае может произойти или нет.

Для случайных погрешностей характерен ряд условий:

- малые по величине случайные погрешности встречаются чаше, чем большие;

- отрицательные и положительные относительно средней величи­ны измерений, равные

по величине погрешности, встречаются одинаково часто;

- для каждого метода измерений есть свой предел, за которым по­грешности практически

не встречаются (в противном случае, эта погрешность будет грубым промахом).

Выявление случайных погрешностей особенно необходимо при точных, например, лабораторных измерениях. Для этого использу­ют многократные измерения одной и той же величины, а их резуль­таты обрабатываются методами теории вероятностей и математиче­ской статистики. Это позволяет уточнить результаты выполненных измерений.

Влияние случайных погрешностей выражается в разбросе полу­ченных результатов относительно математического ожидания, поэто­му количественно наличие случайных погрешностей хорошо оцени­вается среднеквадратическим отклонением (СКО).

Случайные погрешности измерения, не изменяя точности ре­зультата измерений, тем не менее, оказывают влияние на его до­стоверность.

При этом дисперсия среднего арифметического ряда измерений всегда имеет меньшую погрешность, чем погрешность каждого опре­деленного измерения. Если необходимо повысить точность резуль­тата (при исключенной систематической погрешности) в 2 раза, то количество измерений надо увеличить в 4 раза.

**Грубые погрешности** (**промахи**) — это погрешности, не харак­терные для технологического процесса или результата, приводящие к явным искажениям результатов измерения. Наиболее часто они допускаются неквалифицированным персоналом при неправильном обращении со средством измерения, неверном отсчете показаний, ошибках при записи или вследствие внезапно возникшей посторон­ней причины при реализации технологических процессов обработки деталей. Они сразу видны среди полученных результатов, т. к. из­влеченные значения отличаются от остальных значений совокуп­ности измерений.

Если в процессе измерений удается найти причины, вызываю­щие существенные отличия, и после устранения этих причин по­вторные измерения не подтверждают подобных отличий, то такие измерения могут быть исключены из рассмотрения. Но необдуман­ное отбрасывание резко отличающихся от других результатов изме­рений может привести к существенному искажению характеристик измерений. Иногда при обработке результатов измерений учет всех обстоятельств, при которых они были получены, не представляется возможным. В таком случае при оценке грубых промахов приходит­ся прибегать к обычным методам проверки статистических гипотез.

**Правильность измерений** определяется близостью к нулю си­стематической погрешности.

**Достоверность измерений** зависит от степени доверия к ре­зультату и характеризуется вероятностью того, что истинное значе­ние измеряемой величины лежит в указанных окрестностях действи­тельного.

**§ 8. Выбор средств измерений**

При выборе средств измерений учитывают совокупность метро­логических (цена деления, погрешность, пределы измерений, изме­рительное усилие), эксплуатационных и экономических показате­лей, к которым относятся: массовость (повторяемость измеряемых размеров) и доступность их для контроля; стоимость и надежность средства измерения; метод измерения; время, затрачиваемое на на­стройку и процесс измерения; масса, габаритные размеры, рабочая нагрузка; жесткость объекта контроля, шероховатость его поверхно­сти; режим работы и т. д.

Основная трудность технико-экономического подхода при выбо­ре СИ заключается в том, что сам процесс измерения не сопрово­ждается непосредственным созданием материальных ценностей.

Комплексность задачи выбора средств измерения определила необходимость разработки различных способов выбора средств из­мерения. Прежде всего, выбранное средство измерения должно со­ответствовать по своей конструкции и габаритам для установки из­меряемой детали и подходов измерительных устройств к измеряемой величине.

В массовом производстве основными средствами измерения яв­ляются высокопроизводительные механизированные и автоматизиро­ванные средства измерения и контроля.

В серийном производстве основными средствами измерения и контроля служат предельные калибры, шаблоны, специальные кон­трольные приспособления и при необходимости — универсальные средства измерения.

В мелкосерийном и индивидуальном производстве основными являются универсальные средства измерения.

По метрологическим характеристикам выбираемыми параметра­ми средств измерений являются предельная погрешность измерения (ее часто называют пределом допускаемой погрешности), а также цена деления шкалы измерительного средства.

В соответствии с требованиями ГОСТ 8.051-81 установлены соот­ношения между заданными допусками на измеряемые (контролиру­емые) размеры, определенного номинального размера и квалитета, и допускаемыми погрешностями измерения, определяющими действи­тельный размер измеряемой величины.

Цена деления шкалы выбирается с учетом заданной точности измерения. Например, если размер задан с точностью до 0,01 мм, то прибор выбирается с ценой деления шкалы 0,01 мм. Принятие более грубой шкалы вносит дополнительные субъективные погрешности, а более точной — удорожает средство измерения. При контроле технологических процессов используют средства измерения с ценой деления не более 1/6 допуска на изготовление.

При решении комплексной задачи выбора средств измерения, помимо технических параметров, решается задача по обеспечению минимальных затрат, связанных с риском 1-го и 2-го рода.

Главным фактором при выборе средства измерения является до­пускаемая погрешность измерения.

Чем ближе значение предельной погрешности измерительного средства к значению допускаемой погрешности измерения, тем ме­нее трудоемким и более дешевым будет измерение.

Значения размеров, полученных при измерении с погрешностью, не превышающей допускаемую погрешность измерения, принимают­ся за действительные.

**Вопросы**

1. Что понимается под метрологией?

2. Какие разделы включает метрология?

3.Дайте определение базовых понятий метрологии: свойство, вели­чина, измерение, единство измерений, средство измерения.

4.Дайте определение понятиям «физическая величина» и «система физических величин».

5. Назовите основные классификационные признаки и виды физи­ческих величин.

6. Что понимается под шкалой измерения? Какие виды шкал из­6. мерения физических величин существуют? Приведите примеры практического использования этих шкал.

7. Охарактеризуйте роль Генеральной конференции по мерам и ве­сам в формировании международной системы единиц физиче­ских величин.

8. Назовите основные принципы формирования СИ.

9. Перечислите основные и дополнительные единицы СИ, дайте им определение.

10. Как образуются производные единицы СИ? Что означает их ко­герентность?

11. Что такое кратная и дольная единицы физической величины?

12. Какие виды внесистемных единиц вы знаете?

13. Поясните понятие «единство измерений». Как оно достигается?

14. Что такое «эталон», и какими свойствами он должен обладать?

15. Приведите классификацию эталонов по их метрологическому на­значению.

16. Что такое «поверочная схема»?

17. В чем состоят особенности прямых, косвенных, совокупных и со­вместных измерений физических величин?

18. Какие виды измерений физических величин различают по при­знаку отношения к основным единицам измерения; по характеру изменений измеряемой величины; по количеству измерительной информации?

19. В чем заключается метод непосредственной оценки физической величины?

20. Как определяются значения физических величин при использо­вании методов сравнения с мерой?

21. Назовите виды средств измерений, дайте их описание.

22. Что понимается под метрологическими характеристиками средств измерений?

23. Какие метрологические характеристики средств измерений от­носятся к числу наиболее распространенных? Что они пока­зывают?

24. Что понимается под «качеством измерений»? Какими показате­лями оно характеризуется?

25. Назовите виды погрешностей измерений.

26. Какие существуют способы обнаружения и исключения система­тических, случайных и грубых погрешностей измерений?

27. Какие факторы и показатели учитывают при выборе средств измерений?